

Кругликов Антон Евгеньевич

**ЭФФЕКТИВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ,
ВЕРИФИЦИРОВАННЫЕ НА ЭКСПЕРИМЕНТАХ СТЕНДА АСТРА**

Специальность 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,
радиационная безопасность

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Автор:



Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

**Научный
руководитель:**

Волков Юрий Николаевич

Кандидат технических наук, доцент отделения ядерной физики и технологий офиса образовательных программ (411) института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ, г. Москва

**Официальные
оппоненты:**

Ельшин Александр Всеволодович

Доктор технических наук, Главный научный сотрудник отдела нейтронно-физических исследований

ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор, Ленинградская обл. Копорское шоссе, д. 72

Мантуров Геннадий Николаевич

Доктор технических наук, Главный научный сотрудник департамента физики реакторов. Лаборатория №12.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» г. Обнинск, пл. Бондаренко, д.1, Калужская область

Попыкин Александр Иванович

Кандидат физико-математических наук, Старший научный сотрудник.

Начальник лаборатории отдела расчетных обоснований безопасности НТЦ ЯРБ г. Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5

Защита диссертации состоится **«27» декабря 2023 г. в 15:00** часов на заседании диссертационного совета МИФИ.2.02 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, тел. +7 (495) 788-56-99)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ds.mephi.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023

Ученый секретарь
диссертационного совета МИФИ.2.02
кандидат технических наук



Куликов Е.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы

Актуальность тематики, связанной с реакторами ВТГР, вызвана ростом интереса к работам по водородной энергетике, включающей создание ВТГР для энерготехнологических приложений, а также тем, что данный тип реакторов является одним из перспективных типов ЯЭУ, входящих в Поколение IV.

Основными особенностями данных реакторов, влияющими на их нейтронно-физические характеристики, являются:

- топливо в виде частиц с многослойным покрытием, размещенных в графитовой матрице твэлов (двойная гетерогенность размещения топлива в активной зоне);
- большое отношение высоты активной зоны к ее диаметру ($H/d = 1,5 - 3$), приводящее к чувствительности высотного энергораспределения к положению регулирующих стержней;
- кольцевая активная зона, характеризующаяся высокой радиальной неравномерностью энергораспределения и др.

Вследствие перечисленных особенностей, нейтронно-физические параметры перспективных реакторов типа ВТГР значительно отличаются от параметров большинства существующих энергетических реакторов, для которых разработаны и верифицированы инженерные и прецизионные программы нейтронно-физического расчета. Поэтому, в соответствии с требованиями национальных надзорных органов безопасности, необходимы тщательная верификация нейтронно-физических программ, используемых для расчета перспективных реакторов типа ВТГР, и доказательство применимости данных программ для моделирования реального объекта.

Определяющее значение для верификации и валидации кодов на стадии проектирования реактора имеет расчетное моделирование экспериментов на критических сборках и экспериментальных реакторах данного типа. Поэтому моделирование экспериментов на критических стендах типа ВТГР и разработка методик и расчетных инструментов для проведения этого моделирования является актуальной задачей.

Целью диссертационного исследования является разработка и верификация эффективных расчетных моделей нейтронно-физических характеристик высокотемпературных ядерных реакторов с насыпной активной зоной из шаровых топливных элементов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- Обобщены и проанализированы результаты экспериментов, проведенных на критическом стенде АСТРА в обоснование нейтронно-физических характеристик проектов реакторов ВТГР, а также выполненных ранее расчетов.
- Разработаны расчетные модели и проведен расчетный анализ стационарных экспериментов по определению параметров критичности, характеристик органов регулирования и пространственных распределений скоростей реакций деления ^{235}U с помощью интеллектуальной системы SHIPR и с помощью программы MCU-HTR, реализующей метод Монте-Карло.
- Проведен расчетный анализ нестационарных экспериментов по определению кинетических параметров с помощью интеллектуальной системы SHIPR.
- Предложена и применена методика подготовки констант для реакторов типа ВТГР с шаровыми твэлами с использованием программ, реализующих метод Монте Карло.
- Проведена кросс-верификация программ MCU-HTR и Serpent на основе упрощенных моделей критического стенда АСТРА.

Научная новизна

Наиболее важные достигнутые результаты с точки зрения научной новизны:

1. Впервые разработаны модели экспериментальных конфигураций критического стенда АСТРА серий А, В для расчета по прецизионной программе MCU-HTR, проведено расчетное моделирование экспериментов и получено удовлетворительное согласие с результатами экспериментов по определению пространственных распределений скоростей реакций деления и характеристик органов регулирования.

2. Впервые разработаны модели для расчета нестационарных экспериментов на критическом стенде АСТРА по определению кинетических параметров методом Симонса-Кинга, проведено расчетное моделирование этих экспериментов и получено удовлетворительное согласие с результатами измерений.

3. Предложена новая методика подготовки малогрупповых макроконстант для реакторов ВТГР с шаровыми твэлами с помощью программ расчета методом Монте Карло (MCU-HTR и Serpent), использование которой позволило уменьшить расхождение результатов диффузионных расчетов с экспериментальными данными.

Практическая значимость работы

1. Получены результаты для верификации программы MCU-HTR путем сопоставления с экспериментальными данными с целью последующей аттестации MCU-HTR.

2. Получены результаты для кросс-верификации программ MCU-HTR и Serpent применительно к высокотемпературным газовым реакторам с шаровыми твэлами с целью последующей аттестации MCU-HTR.

3. Полученные результаты расчетного анализа экспериментов на критическом стенде АСТРА использованы для разработки международного бенчмарка по высокотемпературным реакторам.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты расчетного анализа с помощью интеллектуальной системы SHIPR и прецизионной программы MCU-HTR экспериментов на критическом стенде АСТРА серий А, В по определению: параметров критичности, пространственных распределений скоростей реакций деления урана-235, характеристик органов регулирования.

2. Результаты расчетного анализа экспериментов по определению кинетических параметров критического стенда АСТРА методом Симонса-Кинга с помощью интеллектуальной системы SHIPR.

3. Методика подготовки констант для реакторов ВТГР с шаровыми твэлами с помощью программ расчета методом Монте-Карло на основе выбора моделей и способов гомогенизации для топливных и нетопливных элементов реактора.

4. Результаты кросс-верификации программ MCU-HTR и Serpent на основе упрощенных моделей критического стенда АСТРА.

5. Методика кросс-верификации программ прецизионного расчета с использованием различных библиотек нейтронных данных при моделировании систем ВТГР.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы докладывались на всероссийских и международных семинарах и конференциях, среди которых:

- научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» (Нейтроника - 2018);

- научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» (Нейтроника - 2019);

- Международная конференция по физике реакторов «Волга-2016»;

- Международная конференция молодых специалистов, ученых и аспирантов по физике ядерных реакторов «Волга-2018»;

- VI Ежегодный Всероссийский молодежный научный форум OPEN SCIENCE 2019;

- OSCAR5 Workshop, 2019;

- Международная конференция молодых специалистов, ученых и аспирантов по физике ядерных реакторов «Волга-2020»;

- Международная молодежная школа-конференция по ядерной физике и технологиям INPhE-2020;

- 17-ая ежегодная конференция «Будущее атомной энергетики – ATOMFUTURE 2021»;

- научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» (Нейтроника - 2022).

По результатам работы опубликовано 11 научных статей, 9 из которых в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science и 2 в журналах из перечня ВАК.

Список основных публикаций по теме работы приведен в конце автореферата.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

В **первой главе (Литературный обзор)** представлен литературный обзор по тематике высокотемпературных реакторов. Приведены краткая история развития, текущее состояние и перспективы данного направления ядерных технологий. Перечислены основные особенности данных реакторов и обоснована необходимость верификации и валидации программных средств, используемых для нейтронно-физических расчетов реакторов данного типа с доказательством применимости к реальному объекту.

Проведен анализ большей части доступных на данный момент описаний экспериментов и тестов, а также выполненных расчетов, исходя из которого сделан вывод о том, что существует большой недостаток как экспериментальных данных, так и проведенных расчетов по определению многих важных реакторных функционалов.

Дано краткое описание критического стенда АСТРА и экспериментов, выполненных на нем, которые посвящены изучению нейтронно-физических характеристик перспективного модульного реактора ВТГР с кольцевой активной зоной. Приведено сравнение основных характеристик перспективного реактора ВТГР с кольцевой активной зоной и экспериментальных конфигураций критического стенда АСТРА, моделирующих реактор данного типа. На основании сравнения сделан вывод о представительности экспериментов на стенде АСТРА в обоснование физических особенностей данных реакторов. На рисунках 1, 2 приведены схемы продольного и поперечного разрезов критического стенда АСТРА с активной зоной, моделирующей физические особенности модульного реактора ВТГР с кольцевой активной зоной. Проводимые эксперименты включали в себя определение параметров критичности, пространственного распределения скоростей реакций деления урана-235, а также характеристик органов регулирования. Для ряда конфигураций были проведены измерения кинетических параметров методом Симонса-Кинга. Всего на данной конфигурации критического стенда проведено три серии экспериментов, отличающихся способом выравнивания поля энерговыделения:

- серия 1, в которой использовались неизвлекаемые поглощающие стержни (НПС) во внутреннем отражателе (ВО),
- серия А, в которой использовались профилирующие поглощающие элементы (ППЭ) в ВО на границе с активной зоной,
- серия В, в которой использовались профилирующие поглощающие элементы в активной зоне на границе с боковым отражателем (БО).

Выполнен обзор данных экспериментов, а также ранее выполненных расчетов.

В таблице 1 приведены данные о выполненных расчетных анализах серий экспериментов на критическом стенде АСТРА в обоснование нейтронно-физических характеристик реакторов ВТГР с кольцевой активной зоной.

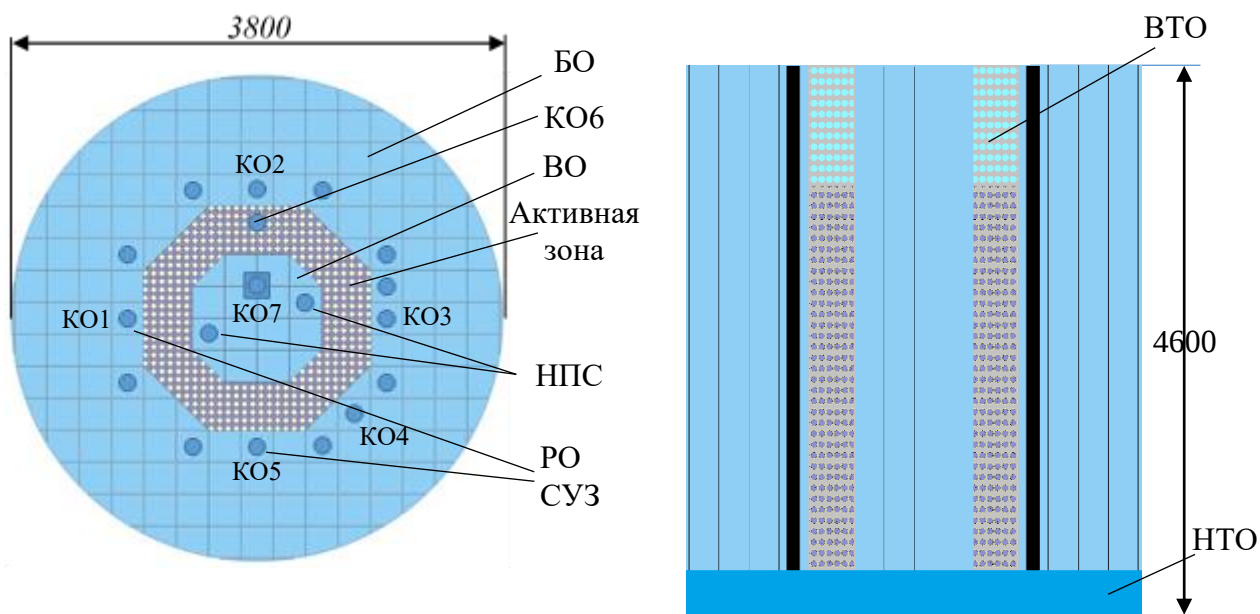


Рисунок 1 – Схема критического стенда АСТРА в горизонтальном сечении

Рисунок 2 – Схема критического стенда АСТРА в вертикальном сечении

Таблица 1 – Ранее проведенные расчеты экспериментов на критическом стенде АСТРА

	Параметры критичности	Характеристики РО СУЗ	Распределения скоростей реакций деления	Определение кинетических параметров
Серия 1 (НПС в ВО)	JAR-NTGR, MCU, Serpent и др.	частично JAR-NTGR	частично JAR-NTGR	Не выполнено
Серия А (ППЭ в ВО)	Частично JAR - NTGR			
Серия В (ППЭ в а.з.)	Частично JAR-NTGR			

Как видно из таблицы 1, расчетный анализ ряда экспериментов был выполнен с помощью программы JAR-NTGR. Кроме того, анализ большей части стационарных экспериментов и всех нестационарных экспериментов выполнен не был. Таким образом, возникла задача проведения нейтронно-физических расчетов оставшихся экспериментов, а также выявления причин расхождения результатов, полученных с помощью программы JAR-NTGR.

Рассмотрены основные методы расчетов, применяемые для большинства современных энергетических реакторов.

На основе проведенного литературного обзора сформулирована задача расчетного анализа экспериментов в обоснование нейтронно-физических характеристик перспективного реактора ВТГР с кольцевой активной зоной, выполненных на критическом стенде АСТРА. Обоснована необходимость решения данной задачи с использованием средств и методов, широко применяемых при физических расчетах большинства проектируемых и существующих реакторов с сопутствующей разработкой необходимых методик, учитывающих особенности данных реакторов и повышающих точность их нейтронно-физических расчетов.

Во второй главе (Расчетный анализ стационарных экспериментов по моделированию модульного высокотемпературного газоохлаждаемого реактора с кольцевой активной зоной на критическом стенде АСТРА) приведено описание стационарных экспериментов, проведенных на экспериментальных конфигурациях критического стенда АСТРА. Описаны основные подходы к моделированию данных экспериментов, которые бы-

ли использованы в расчетах с помощью прецизионной программы MCU-HTR и диффузионной программы SHIPR.

Общее число различных экспериментальных конфигураций критического стенда АСТРА с кольцевой активной зоной составило 27. При определении значений $K_{эф}$ экспериментальных конфигураций с помощью программы MCU-HTR параметры моделирования были подобраны таким образом, чтобы обеспечивать статистическую погрешность расчета $K_{эф}$ не более 0,009 %. Для обеспечения данной статистической погрешности минимальное число моделируемых историй было задано порядка 150 млн. Результаты расчетов эффективного коэффициента размножения ($K_{эф}$) с использованием программы MCU-HTR критических состояний экспериментальных конфигураций серии 1 и серии В приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов $K_{эф}$ критических состояний для экспериментальных конфигураций серии 1 и серии В с использованием MCU-HTR

Конфигурация (1-я серия)	$K_{эф}$	Конфигурация	$K_{эф}$
1	1.00998	1В	1,01235
2	1.01093	2В	1,01189
3	1.01143	3В	1,01182
4	1.01159	4В	1,01246
5	1.01285	5В	1,01480
		6В	1,01336
		7В	1,01502
		8В	1,01502

Для конфигураций критического стенда АСТРА с поглощающими профилирующими элементами во внутреннем отражателе (серия А) проведены 2 серии экспериментов: серия экспериментов на конфигурациях, сформированных во время загрузки активной зоны, и серия экспериментов на конфигурациях, сформированных во время разгрузки активной зоны. Результаты расчетов эффективного коэффициента размножения критических состояний с использованием программы MCU-HTR для данных конфигураций приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов $K_{эф}$ для экспериментальных конфигураций серии А

Конфигурация	Загрузка активной зоны	Разгрузка активной зоны
	$K_{эф}$	$K_{эф}$
1А	1,01141	1,01215
2А	1,01025	1,01099
3А	1,01199	1,01153
4А	1,01338	1,01159
5А	1,01372	1,01378
6А	1,01412	1,01458
7А	1,01367	1,01466

Как видно из результатов расчетов критических состояний, программа с помощью MCU-HTR, наблюдается тенденция систематического завышения расчетных значений $K_{эф}$ на 1.1% - 1.4%, что является характерным результатом как для критического стенда АСТРА, так и для других экспериментальных стендов, на которых выполняются исследования, связанные с ВТГР (PROTEUS, CNPS). Кроме того, результаты расчетов эффективного коэффициента размножения с помощью программы MCU-HTR для экспериментальных конфигураций критического стенда АСТРА с кольцевой активной зоной говорят о том, что существует тенденция к увеличению расхождения результатов расчета от эксперимента при увеличении высоты шаровой засыпки активной зоны. Это может быть объяснено тем, что

при увеличении высоты активной зоны увеличивается неопределенность эксперимента, связанная с расположением шаровых топливных элементов. Подобная тенденция наблюдается при расчете экспериментальных конфигураций критического стенда АСТРА с помощью различных программ, реализующих метод Монте-Карло.

Для расчетов с использованием программы SHIPR были выбраны конфигурации 1А, 5А, 7А, 6В, 7В, 8В, которые в полной мере позволяют оценить корректность учета влияния различных компонентов критического стенда с помощью многогруппового диффузионного приближения.

Результаты расчетов эффективного коэффициента размножения критических состояний с помощью программы SHIPR для экспериментальных конфигураций 1А, 5А, 7А, образованных во время разгрузки активной зоны, и конфигураций 6В, 7В, 8В представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчетов $K_{эф}$ с помощью программы SHIPR

Конфигурация	$K_{эф}$	Конфигурация	$K_{эф}$
1А	1,0142	6В	0,9979
5А	1,0086	7В	1,0005
7А	0,9911	8В	1,0042

Наибольшее расхождение с экспериментом в представленных результатах наблюдается для конфигурации 1А и составляет 1.4%, что связано с погрешностью, вносимой использованием эффективной добавки к высоте активной зоны. Для остальных конфигураций расхождение с экспериментом ниже и составляет менее 1%, что, учитывая неопределенность эксперимента и погрешность диффузионного приближения, можно считать хорошим результатом.

Экспериментальное определение пространственных распределений скоростей реакций деления исследовалось методом регистрации γ -излучения продуктов деления в образцах, которые кратковременно облучались в экспериментальных каналах критического стенда АСТРА. Схема расположения детекторов в экспериментах по определению радиальных и высотных распределений представлена на рисунке 3. Для расчета пространственного распределения скоростей реакций с помощью программы MCU-HTR в расчетной модели в экспериментальных каналах задавались детекторы, которые использовались в качестве регистрационных областей для определения скоростей реакций деления урана, при этом геометрические размеры и материальный состав детекторов соответствовал используемому в эксперименте. Для получения расчетных значений скоростей реакций деления ^{235}U с помощью программ, реализующих диффузионное приближение, в экспериментальных точках была проведена процедура интерполяции микроскопических сечений, позволяющая учесть реальный спектр в точке расположения детектора путем его представления в виде суперпозиции спектров активной зоны и отражателя, веса которых определены на основе полномасштабного расчета.

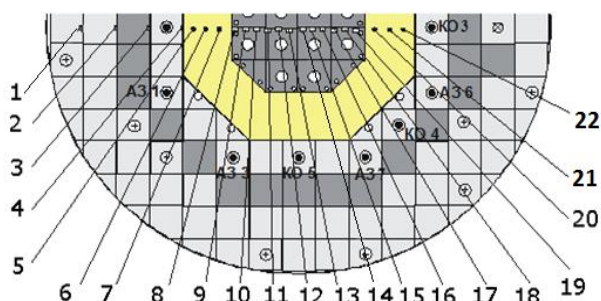


Рисунок 3 – Схема расположения детекторов в экспериментах по определению пространственного распределения скоростей реакций деления ^{235}U

Сводные результаты расчетов пространственных распределений скоростей реакций деления с использованием программ MCU-HTR и SHIPR для наиболее насыщенных с точки зрения количества измерений экспериментальных серий приведены в таблицах 5 – 6.

Таблица 5 – Сводные результаты расчетов пространственных распределений скоростей реакций деления с использованием программ MCU-HTR и SHIPR для экспериментальных конфигураций серии с ППЭ в ВО, образованных во время разгрузки активной зоны

Конфигурация	Номер канала	Средняя погрешность, %		Максимальная погрешность, %	
		MCU-HTR	SHIPR	MCU-HTR	SHIPR
1A (разгрузка)	6	3,0	5,1	4,7	13,6
	21	4,9	4,2	8,7	22,6
	2	3,5	5,6	10,5	14,5
	14	2,8	2,0	5,5	4,5
	Радиальное распределение	5,0	3,7	11,5	12,4
5A (разгрузка)	6	6,0	8,1	14,0	20,8
	21	5,0	6,7	13,8	21,2
	Радиальное распределение	3,0	2,4	7,9	9,8
7A (разгрузка)	2	6,2	8,2	10,6	13,9
	6	4,4	5,1	8,7	10,4
	14	4,0	5,1	16,9	14,5
	21	5,3	5,8	10,7	12,1
	Радиальное распределение	5,4	4,6	16,9	15,1

Таблица 6 – Сводные результаты расчетов с использованием программ MCU-HTR и SHIPR пространственных распределений скоростей реакций деления для экспериментальных конфигураций серии с ППЭ, расположенными на границе активной зоны и БО

Конфигурация	Номер канала	Средняя погрешность, %		Максимальная погрешность, %	
		MCU-HTR	SHIPR	MCU-HTR	SHIPR
1B	Радиальное распределение	3,7	-	6,8	-
3B	Радиальное распределение	3,4		9,4	
	6	9,3		19,5	
4B	Радиальное распределение	2,8		6,5	
5B	Радиальное распределение	3,7		7,8	
6B	6	7,6	5,9	14,4	17,0
	Радиальное распределение	2,8	2,4	8,0	11,6
7B	4	5,4	8,0	9,7	17,0
	6	4,6	9,2	7,7	15,7
8B	4	5,5	9,7	22,1	19,5
	6	3,3	7,2	8,0	14,4

На рисунках 4 – 5 в качестве примера представлены расчетные и экспериментальные кривые для радиального распределения в конфигурации 7A и аксиального распределения в канале 4 конфигурации 8B соответственно.

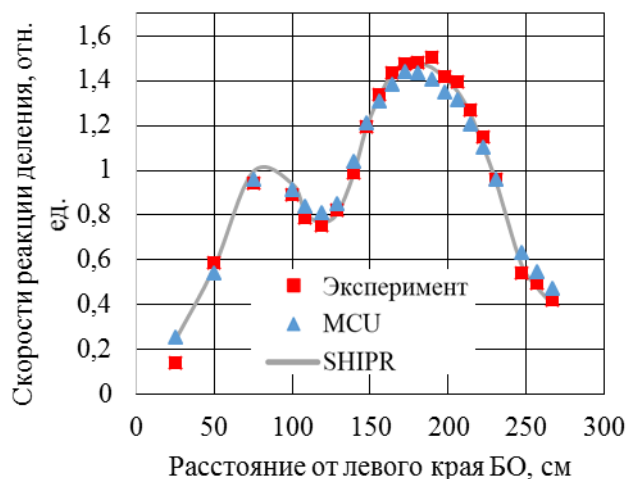


Рисунок 4 – Распределение скорости реакции деления ^{235}U в радиальном направлении для конфигурации 7А

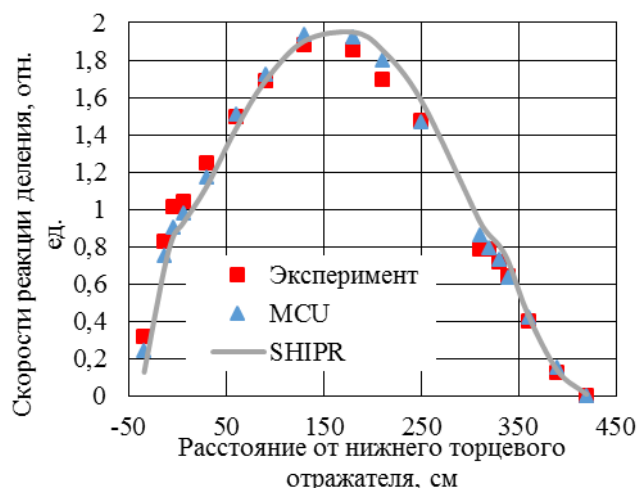


Рисунок 5 – Аксиальное распределение скоростей реакций деления ^{235}U в канале 4 конфигурации 8В.

Как видно из сводных результатов расчетов пространственных распределений скоростей реакций деления, средняя погрешность расчета с использованием программы MCU-HTR практически для всех серий измерений находится в пределах экспериментальной неопределенности. При расчете с использованием программы SHIPR средняя погрешность расчета превышает заявленную экспериментальную неопределенность для ряда измерений и может доходить до 8-10 %. Также стоит отметить, что хорошее согласие результатов расчетов с помощью программы SHIPR с использованием параллельных вычислений и программы JAR-HTGR без их использования позволили сделать вывод о корректности работы схемы организации параллельных вычислений в программе SHIPR применительно к разработанным диффузионным расчетным моделям стенда АСТРА. Это в свою очередь говорит о возможности применения программы SHIPR для расчетного анализа нестационарных экспериментов, выполненных на критическом стенде АСТРА, поскольку использование параллельных вычислений позволяет значительно снизить время расчета.

Анализ результатов расчетов характеристик органов регулирования с использованием программы MCU-HTR показал хорошее согласие расчетов с экспериментом. Относительная погрешность для большинства расчетных значений составила 3 – 5%. Относительная погрешность расчетов характеристик органов регулирования по программе SHIPR не превышает 13 %, за исключением стержня КО-6, расположенного в активной зоне. Для стержня КО-6 во всех конфигурациях наблюдается систематически высокая погрешность расчета, что связано с использованием диффузионного приближения и констант, подготовленных с помощью ячеечной программы, которая грубо учитывает окружение стержня, расположенного внутри кольцевой активной зоны вблизи бокового и внутреннего отражателей.

В третьей главе (Расчетный анализ нестационарных экспериментов по определению кинетических параметров методом Симмонса-Кинга) представлены результаты расчетного анализа нестационарных экспериментов по определению кинетических параметров критического стенда АСТРА методом Симмонса-Кинга (см. G.R. Keepin, Physics of Nuclear Kinetics. Addison - Wesley Publishing Company 1965. Москва, Атомиздат 1967). Данный метод основан на измерении с помощью временного анализатора спада потока мгновенных нейтронов в сборке после инъекции быстрых (14 МэВ) нейтронов. Для системы в подкритическом или критическом состоянии спад потока мгновенных нейтронов по истечении некоторого промежутка времени после импульса (инъекции) быстрых нейтронов описывается, в основном, экспонентой с показателем (постоянная спада) α в течение нескольких периодов (α^{-1}), после чего заметный вклад начинает вносить и спад запаздывающих нейтронов.

В точечном приближении кинетических уравнений постоянная спада связана с кинетическими параметрами сборки соотношением:

$$\alpha = (\beta_{\text{eff}}/\Lambda)(\rho/\beta_{\text{eff}} - 1) \quad (1)$$

где Λ - время генерации мгновенных нейтронов. В рассматриваемом диапазоне изменения подкритичности сборки, в предположении независимости β_{eff} и Λ от величины подкритичности, $\Lambda \approx l$, где l – время жизни нейтронов; ρ – реактивность сборки.

Для критического состояния системы, когда $\rho/\beta_{\text{eff}} = 0$, справедливо соотношение:

$$\alpha_0 = -(\beta_{\text{eff}}/\Lambda) \quad (2)$$

Откуда следует:

$$\rho/\beta_{\text{eff}} = 1 - \alpha/\alpha_0 \quad (3)$$

Определение кинетических параметров методом Симмонса-Кинга сводится к измерению α и определению α_0 . Эксперименты проводились для сборки, находящейся в подкритическом состоянии, при нескольких значениях подкритичности (ρ/β) в диапазоне примерно от 1 до 6. Для определения параметра α производилось измерение с помощью временного анализатора спада потока нейтронов в сборке после инъекции с помощью импульсного нейтронного генератора быстрых (14 МэВ) нейтронов. Расчет соответствующих экспериментов выполнен с помощью интеллектуальной системы SHIPR. Групповые скорости нейтронов, необходимые для проведения нестационарного расчета средством, реализующим приближение пространственной кинетики, определялись с помощью программы MCU-HTR для каждой из конфигураций. Для обоснования выбора используемых групповых скоростей были проведены расчеты с использованием скоростей, подготовленных с помощью спектров, рассчитанных по MCU-HTR, и скоростей, соответствующих средней энергии на энергетическом интервале. Расчеты проведены для одного из подкритических состояний конфигурации 6В, для которого значение подкритичности, определенное экспериментальным и расчетным путем максимально близки. Помимо влияния значений групповых скоростей исследовалось влияние точности задания временного шага, определяемое параметром tol . На рисунке 6 представлены экспериментальная и расчетные кривые спада для одного и того же состояния сборки в конфигурации 6В, при различных значениях параметра tol . Также на данный график добавлена кривая спада при использовании групповых скоростей, соответствующих средней энергии энергетического интервала при параметре $\text{tol} = 0,01$. Для каждого из различных значений tol на графике указана длительность расчета.

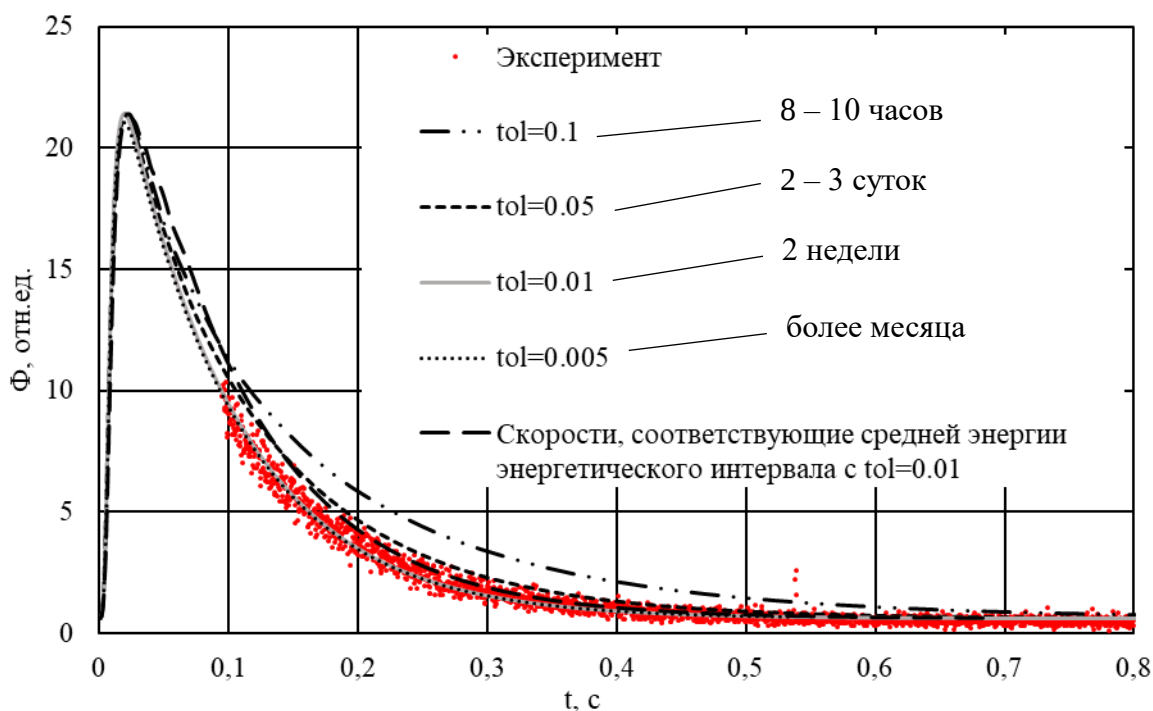


Рисунок 6 – Экспериментальная и расчетные кривые спада для одного из подкритических состояний конфигурации 6В

Как видно из графиков, наиболее близкими к экспериментальным кривым спада оказываются расчетные кривые спада с использованием параметров $\text{tol}=0,01$ и $\text{tol}=0,005$ и групповыми скоростями, подготовленными по спектрам основных физических зон в полномасштабной модели. Выбор значения параметра $\text{tol}=0,01$ и $\text{tol}=0,005$ обеспечивает значительно большую точность пространственно-временного расчета по сравнению с $\text{tol}=0,05$ и $\text{tol}=0,1$. Кроме того, при использовании параметров $\text{tol}=0,01$ и $\text{tol}=0,005$ результаты практически полностью совпадают, что говорит о том, что дальнейшее уменьшение данного параметра не оправданно, поскольку в этом случае значительно увеличивается время расчета, а точность останется прежней.

Таким образом, расчетные кривые спада были получены с использованием групповых скоростей, подготовленных по спектрам полномасштабной модели для каждой из конфигураций при использовании параметра tol , равного 0,01.

С целью получения значения α_0 (формулы 2, 3) результаты экспериментов и расчетов обрабатывались следующим образом: для каждого независимого измерения при разных уровнях подкритичности проводится расчет постоянной спада мгновенных нейтронов в подкритическом состоянии, а затем определяется значение постоянной спада мгновенных нейтронов в критическом состоянии, после чего проводится усреднение величин постоянных спада мгновенных нейтронов для показаний всех детекторов во всех экспериментах.

Полученные для рассчитанных экспериментов значения постоянных спада мгновенных нейтронов в критическом состоянии приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты определения значения α_0 экспериментальным и расчетным путем

Конфигурация	Значение параметра α_0 , полученное эксперимен- тально (Ξ)	Значение параметра α_0 , полученное расчетным путем (P)	(P- Ξ)/ Ξ , %
1A	3,151	2,848	-9,6
5A	3,281	3,559	8,5
6B	3,524	3,611	2,5
7B	3,596	3,868	7,6
8B	3,349	3,914	16,9

Итоговые расчетные значения постоянных спада мгновенных нейтронов в подкритических состояниях находятся в хорошем согласии с экспериментальными, учитывая более высокую неопределенность эксперимента по сравнению со стационарными экспериментами. Для четырех из пяти конфигураций отклонение от эксперимента составляет менее 10%. Далее обсуждается возможность повышения точности диффузионных расчетов путем использования программ, реализующих метод Монте Карло для подготовки макроконстант.

Четвертая глава посвящена кросс-верификации программ расчета методом Монте-Карло MCU-HTR и Serpent. Необходимость кросс-верификации данных программ применительно к расчетам систем ВТГР обусловлена различными способами учета особенностей реакторов типа ВТГР, реализованными в данных программах, а также уточнением микроскопических сечений и законов рассеяния в более современных библиотеках ядерных данных. Кроме того, была поставлена задача разработки методики подготовки групповых макроконстант с помощью программ расчета методом Монте-Карло для повышения точности диффузионных расчетов, в которых наблюдались более высокие погрешности по сравнению с расчетами методом Монте Карло (таблицы 5-6). Выбор программы Serpent для кросс-верификации обусловлен тем, что данная программа изначально разрабатывалась как программа для подготовки макроконстант и имеет для этой цели различные опции.

Процедура кросс-верификации программ MCU-HTR и Serpent была построена таким образом, чтобы выявить вклад в расхождение между результатами расчета по данным программам отдельных составляющих, обусловленных физическими особенностями ВТГР. Исходя из этого, определены следующие задачи кросс-верификации:

- сравнение моделей учета топливных частиц;
- сравнение моделей термализации нейтронов;
- сравнение расчетов с разными библиотеками констант.

Для кросс-верификации MCU-HTR и Serpent разработан набор из 5-ти модельных задач, представляющих собой упрощенные модели критического стенда АСТРА. Упрощенные модели состоят из основных конструктивных компонентов критического стенда: ВТО, БО, ВО, НТО и активной зоны. Отличие моделей состоит в различной высоте активной зоны, наличии ВТО и аксиальных каналов. Описание рассматриваемых моделей приведено в таблице 8. На примере данных моделей было исследовано влияние на результаты расчета ряда приближений и неопределенностей в исходных данных.

Таблица 8– Описание модельных задач

Модельная задача	Высота активной зоны, см	Наличие ВТО	Наличие аксиальных каналов
1	322,5	+	—
2.1	178,2	—	+
2.2	253	—	+
2.3	322,5	—	+
2.4	322,5	+	+

Сравнение моделей учета топливных частиц

В программе MCU-HTR используется специальная расчетная методика учета топливных частиц (CORN). Согласно этой методике, при блуждании нейтрона в топливном сердечнике топливного элемента используются две системы координат. В первой системе описывается блуждание нейтрона в топливном сердечнике в целом, во второй системе описывается блуждание нейтрона в керне. При блуждании нейтрона в первой системе координат, графитовая матрица с кернами учитывается эффективно, как однородная среда с эффективным макроскопическим сечением. При осуществлении события попадания нейтрона в керн, разыгрывается точка его входа на сферической поверхности керна. После попадания нейтрона в керн моделирование нейтронной траектории внутри керна происходит стандартным для метода Монте-Карло способом. Если нейтрон покидает керн, нейтрон возвращается в эффективную однородную среду, и процесс повторяется.

В программе Serpent применена явная модель задания расположения топливных частиц. Координаты сферических объектов (топливных частиц) считываются из заранее подготовленного файла, и задается трехмерная решеткоподобная структура, которая может быть использована как любое другое пространство в геометрии Serpent. Вместо расположения частиц в регулярной решетке программа создает сетку (в прямоугольной XYZ- геометрии) и накладывает её на шаровой топливный элемент. Каждая ячейка этой сетки имеет список указателей на топливные микросферы, которые расположены внутри ячейки или пересекают её границы. Слежение за нейтронами проводится от одной ячейки сетки к другой, подобно обычной решетке, и программа проверяет пересечение нейтроном границ только для сфер, которые перечислены в списке указателей данной ячейки. Генерация файла с координатами случайно распределенных топливных частиц проводится с помощью специальной подпрограммы в Serpent на основе заданного коэффициента упаковки и размера частиц.

Сравнение моделей учета топливных частиц проведено для бесконечной решетки шаровых твэлов и модели активной зоны 2.1 (таблица 8).

Различие в коэффициенте размножения бесконечной решетки между MCU-HTR и Serpent с библиотеками ENDFB/VII.0 составило -0.003 (-0.097% $\Delta k/k$). Это различие в основном связано с разными моделями топливных частиц и разными библиотеками ядерных данных. При этом библиотеки констант Serpent были максимально приближены к библиотекам банка MDBHTR 50, в котором сечения изотопов урана и графита основаны на данных из ENDFB/VII.0. Влияние различий в моделях термализации для задачи без утечки нейтронов минимально. Таким образом, различие в коэффициенте размножения бесконечной решетки между MCU-HTR и Serpent с библиотеками ENDFB/VII.0 связано с различием между алгоритмом учета топливных частиц CORN, используемом в MCU-HTR, и явным методом задания топливных частиц, используемом в Serpent.

Проведены также расчеты модельной задачи 2.1 по MCU-HTR и Serpent с шаровыми твэлами с гетерогенным заданием топливных частиц и с твэлами в виде гомогенной смеси, то есть без использования специальных методик для гетерогенного задания топливных частиц. Было установлено, что расхождение между Serpent и MCU-HTR при переходе от гетерогенной модели задания микротвэлов к гомогенной сохраняется (с точностью 0.2% $\Delta k/k$).

Таким образом, было показано, что различия в моделях задания топливных частиц не дают существенного вклада в расхождение в коэффициенте размножения между MCU-HTR и Serpent.

Сравнение моделей термализации нейтронов

В программах MCU-HTR и Serpent учет химических связей и кристаллической структуры замедлителя в области термализации осуществляется путем подключения соответствующих библиотек для моделирования столкновений нейтронов с ядрами замедлителей с учётом непрерывного изменения энергии нейтронов в области термализации, представленных в форме вероятностных таблиц, полученных из законов рассеяния $S(\alpha, \beta)$. MCU-HTR и Serpent используют разные модели термализации.

Проведены расчеты модельных задач 2.1-2.4 по программам MCU-HTR и Serpent с использованием следующих моделей:

MCU F – MCU/модуль FIMTOEN (непрерывное слежение за энергией нейтрона), модель термализации, учитывающая когерентные эффекты на атомах углерода в кристаллической решетке графита при упругом рассеянии,

MCU M – MCU/модуль MOFITTG (многогрупповое приближение), модель термализации, учитывающая когерентные эффекты на атомах углерода в кристаллической решетке графита при упругом рассеянии,

MCU F без $S(\alpha, \beta)$ – MCU/модуль FIMTOEN (непрерывное слежение за энергией нейтрона), модель идеального одноатомного газа для ^{12}C ,

MCU M без $S(\alpha, \beta)$ – MCU/модуль MOFITTG (многогрупповое приближение), модель идеального одноатомного газа для ^{12}C ,

Serpent – непрерывное слежение за энергией нейтрона, модель термализации, учитывающая когерентные эффекты на атомах углерода в кристаллической решетке графита при упругом рассеянии (библиотеки $S(\alpha, \beta)$ из ENDF/B-VII.0),

Serpent без $S(\alpha, \beta)$ – непрерывное слежение за энергией нейтрона, модель идеального одноатомного газа для ^{12}C .

По результатам расчетов обнаружено существенное расхождение по коэффициенту размножения между Serpent и MCU-HTR с непрерывным слежением за энергией нейтрона (от 1,2 до 1,8 % $\Delta k/k$). Различие в коэффициенте размножения между Serpent и MCU-HTR возрастало с уменьшением высоты активной зоны, и, как следствие, с увеличением утечки нейтронов из активной зоны. При этом расчеты по MCU-HTR с использованием многогруппового транспортного приближения в области термализации удовлетворительно совпадали с расчетами по Serpent с моделью непрерывного слежения за энергией нейтрона (различие не более 0,26 %). Следовательно, причиной расхождения являлась модель термализации, используемая модулем FIMTOEN программы MCU-HTR. Чтобы подтвердить данное объяснение были проведены расчеты конфигураций с минимальной и максимальной высотой активной зоны с одинаковой моделью термализации для графита в MCU-HTR и Serpent – моделью идеального одноатомного газа для ^{12}C (без учета когерентных эффектов на атомах углерода в кристаллической решетке графита при упругом рассеянии). Результаты расчета коэффициента размножения представлены в таблице 9.

Таблица 9– Результаты расчета модельных задач по программам MCU-HTR и Serpent с моделью идеального одноатомного газа для ^{12}C в области термализации

Модель	$k_{\text{эфф}}$			Различие MCU F-Serpent, % $\Delta k/k$,
	Serpent без $S(\alpha, \beta)$	MCU F без $S(\alpha, \beta)$	MCU M без $S(\alpha, \beta)$	
2.1	1,0278	1,0275	1,0290	-0.03
2.4	1,1766	1,1756	1,1768	-0.07

Как показывают представленные результаты, различие в коэффициенте размножения между MCU-HTR и Serpent с моделью идеального одноатомного газа для ^{12}C в области термализации составляет менее 0,1 % $\Delta k/k$ и примерно одинаково для конфигураций с минимальной и максимальной высотой активной зоны.

Для более детального исследования различий в моделях термализации в графите с помощью программ MCU-HTR и Serpent сравнили средний квадрат длины смещения нейтрона до его поглощения, вылета из регистрационной области или смены энергетической группы, который используется в MCU-HTR и Serpent для определения коэффициентов диффузии. Проведены расчеты бесконечной среды из графита с заданным источником нейтронов и определены 70-групповые коэффициенты диффузии. Аналогичные расчеты проведены по программе семейства MCU-6, в которой используются более новые библиотеки термализа-

ции. Результаты расчета 70-групповых коэффициентов диффузии представлены на рисунке 7.

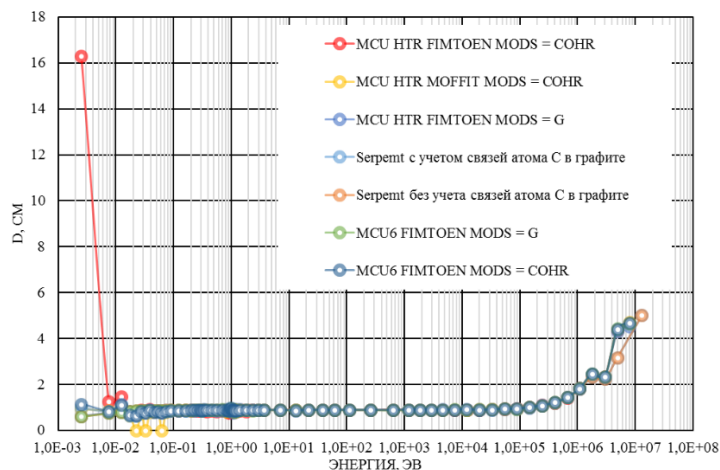


Рисунок 7 – 70-групповые коэффициенты диффузии для бесконечной среды из графита

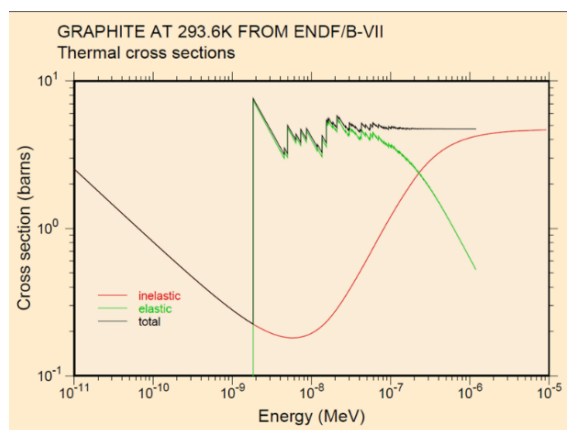


Рисунок 8 – Компоненты сечения рассеяния нейтронов на атомах углерода в графите

Как видно на рисунке, в случае расчета по MCU-HTR с непрерывным слежением за энергией и учетом когерентных эффектов при энергии $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ эВ наблюдается резкий рост коэффициента диффузии и среднего квадрата длины смещения, который приводит к завышению утечки нейтронов и к отличию результатов, полученных с помощью программы MCU-HTR при расчете с модулем FIMTOEN, от других расчетов. При данной энергии сечение упругого когерентного рассеяния на ядрах углерода в графите резко падает до нуля (рисунок 8). Таким образом, в отличие от более поздней версии программы MCU (MCU-6), в версии программы MCU-HTR с непрерывным слежением за энергией термализация нейтронов в графите для энергий ниже первого уровня Брэгга описывалась некорректно.

По результатам вышеописанных исследований разработчиками программы MCU в версию программы MCU-HTR 2011 года были внесены исправления. Результаты расчета модельных задач по программам MCU-HTR и Serpent после внесения изменений в версию программы MCU-HTR 2011 года приведены в таблице 10.

Таблица 10 - Результаты расчета модельных задач по программам MCU-HTR (версия 2021 года, с обновленным модулем FIMTOEN) и Serpent

Модель	K _{эф}			Различие MCU F-Serpent, %Δk/k	Различие MCU M-Serpent, %Δk/k
	Serpent	MCU-HTR (MCU F)	MCU-HTR (MCU M)		
1	1,1968	1,1975	1,1968	0,05	<0,01
2.1	1,0137	1,0149	1,0163	0,12	0,25
2.2	1,1031	1,1043	1,1051	0,10	0,16
2.3	1,1481	1,1488	1,1494	0,05	0,10
2.4	1,1643	1,1650	1,1655	0,05	0,09

Как видно из результатов, приведенных в таблице 10, различие в расчетах с использованием программ Serpent и MCU-HTR (версия 2021 года) сократилось с $>1\% \Delta k/k$ до $<0,15\% \Delta k/k$. Также стоит отметить отличия в расчетах с использованием MCU F и MCU M, которые позволяют сделать вывод о более корректном учете термализации в модуле с непрерывным слежением за энергией нейтрона.

Таким образом, проведенные исследования привели к внесению исправлений в версию программы MCU, используемую для расчетов высокотемпературных реакторов (MCU-HTR). Также проведенные исследования выявили необходимость пересмотра результатов

образцового расчета (sample calculation) из бенчмарка IEU-COMP-THERM-008. В таблице 11 представлены результаты расчета экспериментальных критических состояний конфигураций серии 1 (с НПС) по программе MCU-REA1 (DLC/MCUDAT-2.2) и по исправленной версии MCU-HTR. Приведены также результаты расчета по Serpent с использованием библиотеки JEF3.1.1.

Таблица 11 - Результаты расчета экспериментальных критических состояний конфигураций серии 1 по программам MCU-HTR и Serpent

Конфигурация	MCU-REA1 (DLC/MCUDAT-2.2) FIMTOEN*	MCU-HTR (2021) MOFFIT	MCU-HTR (2021) FIMTOEN	Serpent /JEF3.1.1**
1	0,9912	1,0048	1,0040	1,00805
2	0,9936	1,0068	1,0060	1,01038
3	0,9977	1,0084	1,0074	1,01216
4	0,9989	1,0038	1,0076	1,01305
5	1,0006	1,0085	1,0092	1,01403

*- результаты из IEU-COMP-THERM-008.

** - результаты из Rintala, V., Suikkanen, H., Leppänen, J., & Kyrki-Rajamäki, R. (2015). *Modeling of realistic pebble bed reactor geometries using the Serpent Monte Carlo code. Annals of Nuclear Energy*, 77, 223–230.

Изменение коэффициента размножения после пересчета конфигураций серии 1 составило от 0,6 до 1,2 %Δk/k. Различие между расчетами с двумя различными модулями термализации после перехода на обновленную версию модуля FIMTOEN сокращается таким же образом, как и в случае расчета модельных задач с ~ 1,5 до ~ 0,2%. Также стоит отметить завышение значения $K_{эф}$ по сравнению с экспериментом на ~ 1 %. Подобные отклонения наблюдаются для различных программ, реализующим метод Монте-Карло при расчете с использованием библиотеки ENDF/B-VII.0 конфигураций критического стенда АСТРА.

Сравнение расчетов с разными библиотеками констант

В библиотеках ядерных данных, начиная с ENDF/B-VII.1, JEFF-3.3, JENDL-4.0, тепловое сечение захвата углерода было существенно увеличено. Вместо сечения захвата углерода при энергии 0,0253 эВ 3,368 мбарн, использованного в библиотеках ENDF/B-VII.0, JEFF-3.1.2, RUSFOND-2010, в более поздних версиях (ENDF/B-VII.1, ENDF/B-VIII.0, JENDL-4.0) приведено значение 3,861 мбарн.

Помимо сечения захвата углерода, поглощение нейтронов в графите зависит от содержания примесей. Распространенной практикой учета содержания примесей в графите является введение борного эквивалента. Под борным эквивалентом понимается концентрация ядер бора естественной смеси, которая обеспечивает сечение поглощения нейтронов эквивалентное сечению поглощения при учете всех примесей.

Борный эквивалент для графита критического стенда АСТРА был определен двумя способами:

- по результатам экспоненциальных экспериментов, проведенных производителем графита;
- с помощью лабораторных тестов по определению примесей в образцах, взятых из различных графитовых блоков и заглушек, используемых на стенде АСТРА.

Значения содержания примесей в графите, определенные с помощью лабораторных тестов, имеют большую неопределенность, кроме того, не для всех элементов содержание может быть измерено с удовлетворительной погрешностью. Значение борного эквивалента, оцененное на основе результатов экспоненциального опыта, имеет меньшую неопределенность, но в данном методе необходимо использовать значение микросечения углерода, чтобы отделить поглощение примесями от поглощения на атомах углерода. Кроме того, чтобы получить значение сечения поглощения в графите с учетом примесей, при обработке результатов измерений необходимо использовать некоторые приближенные оценки, такие как коэффициент диффузии графита, поправки для учета размеров графитовой призмы и т. д.

Для оценки погрешности оценки борного эквивалента, определенного с помощью экспоненциальных экспериментов, проведено моделирование этих экспериментов по программе расчета методом Монте-Карло.

Для моделирования экспоненциальных опытов была выбрана программа Serpent, реализующая метод Монте-Карло, поскольку в данной программе имеется возможность выбора использования различных библиотек ядерных данных. В программе Serpent была создана детальная расчетная модель стэнда РБМК с заданием источника нейтронов на основе ^{252}Cf (рисунок 9).

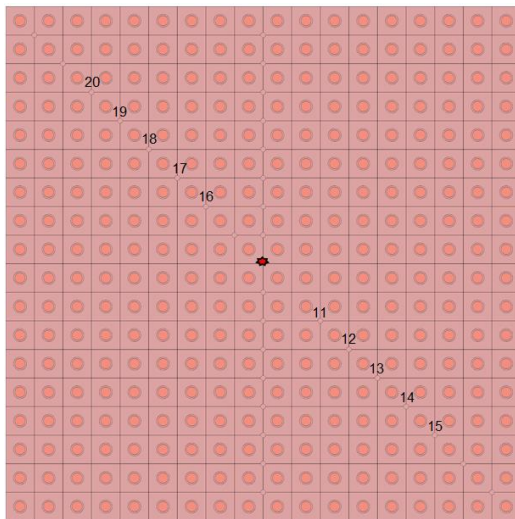


Рисунок 9 – Поперечное сечение расчетной модели стэнда РБМК в программе Serpent

Моделирование проводилось для набора различных содержаний примесей в графите: 0,53; 1,0; 1,1 и 1,5 ppm вес.

Расчеты проведены с использованием нейтронных данных из библиотек ENDF/B-VII.0 и ENDF/B-VII.1. Экспериментальные и расчетные распределения функции $\ln[r\Phi(r)]$ (каналы 11-15) представлены на рисунках 10 и 11. На рисунке 10 представлены результаты расчетов с помощью программы Serpent с использованием библиотеки ENDF/B-VII.0 с борным эквивалентом = 1,1 ppm вес. На рисунке 11 - результаты расчетов с помощью программы Serpent с использованием библиотеки ENDF/B-VII.1 с борным эквивалентом = 1,1 ppm вес.

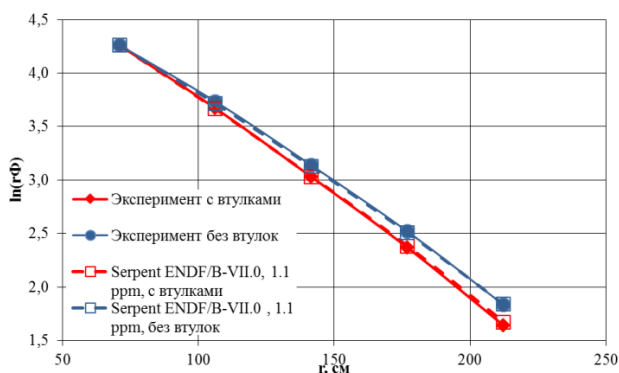


Рисунок 10 – Экспериментальные и расчетные значения функции $\ln[r\Phi(r)]$ в зависимости от расстояния от источника (Serpent/ENDF/B-VII.0)

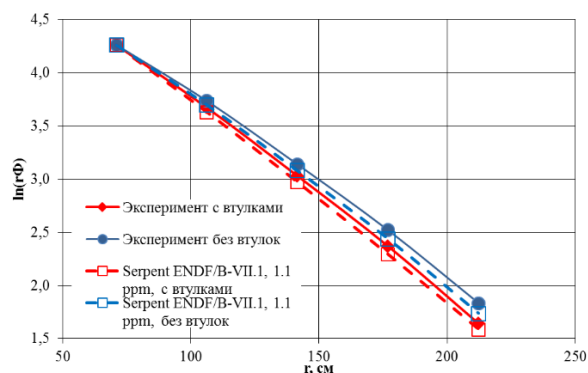


Рисунок 11 – Экспериментальные и расчетные значения функции $\ln[r\Phi(r)]$ в зависимости от расстояния от источника (Serpent/ENDF/B-VII.1)

Результаты расчетов с использованием библиотеки ENDF/B-VII.0 при борном эквиваленте 1,1 ppm вес. хорошо согласуются с экспериментальными данными, как в случае блоков с втулками, так и без них. Результаты расчетов с использованием ENDF/B-VII.1 при борном эквиваленте 1,1 ppm вес. имеют значительное расхождение с экспериментальными данными.

Кроме того, из рисунков 11 и 12 видно, что на интервале от $r=106$ см до $r=177$ см функция $\ln[r\Phi(r)]$ линейна. На данном интервале экспериментальные и расчетные значения потока нейтронов описывается функцией установившегося потока нейтронов в асимптотической области (вдали от источника и границ) для случая точечного источника:

$$\Phi(r) = \frac{A}{r} e^{-r\gamma} \quad (4)$$

где Φ – поток нейтронов, A – константа, и γ – длина релаксации.

В таблице 12 приведены значения γ для экспериментальных и расчетных значений потока нейтронов в асимптотической области (без учета первой и последней точек).

Таблица 12 – Расчетные и экспериментальные значения длины релаксации, полученные при использовании различных значений борного эквивалента

	Борный эквивалент, ppm вес.	Длина релаксации, см ⁻¹	
		Блоки без втулок	Блоки с втулками
Эксперимент, каналы #11...15	-	0,01717	0,01842
Эксперимент, каналы #16...20	-	0,01722	0,01847
Эксперимент, среднее	-	0,01719	0,01841
Serpent/ENDF/B-VII.0	1	0,01701	0,01811
	1,1	0,01711	0,01824
	1,5	0,01769	0,01878
Serpent/ENDF/B-VII.1	0,528	0,01714	0,01810
	1	0,01763	0,01881
	1,1	0,01780	0,01902
	1,5	0,01835	0,01966

Используя линейную интерполяцию между расчетными точками, оценено значение борного эквивалента, соответствующее измеренной длине релаксации. Для эксперимента с блоками без втулок расчетное значение борного эквивалента равно 1,15 и 0,6 ppm вес. для библиотек сечений ENDF/B-VII.0 и ENDF/B-VII.1, соответственно. Для эксперимента с блоками и втулками расчетное значение борного эквивалента равно 1,2 и 0,7 ppm вес. для библиотек сечений ENDF/B-VII.0 и ENDF/B-VII.1, соответственно.

Полученные результаты показали, что методика, ранее использовавшаяся для определения микроскопического сечения поглощения тепловых нейтронов графитом и борного эквивалента на основе измеренных распределений нейтронного потока на стенде РБМК, несмотря на свои приближения, дает те же результаты, что и моделирование методом Монте-Карло с использованием библиотеки ENDF/B-VII.0 при борном эквиваленте 1,15 ppm вес. Таким образом, с помощью моделирования подтверждено экспериментально оцененное значение борного эквивалента.

Борный эквивалент также можно оценить, регистрируя в расчете методом Монте-Карло макросечение поглощения графита с примесями в асимптотической области (вдали от источников, поглотителей и границ). В таблице 13 представлены микросечение поглощения графитом (на 1 ядро углерода), усредненное по тепловой области (σ_{eff}) и микросечение поглощения графита при 0,0253 эВ ($\sigma_{\text{eff}}(0,0253 \text{ эВ})$), рассчитанные при моделировании экспоненциального эксперимента по Serpent/ENDF/B-VII.1 в области канала 13, в зависимости от борного эквивалента.

Таблица 13 – Микросечение графита, рассчитанное в асимптотической области (Serpent/ENDF/B-VII.1).

Борный эквивалент, ppm вес.	σ_{eff} , мб	$\sigma_{\text{eff}}(0,0253 \text{ эВ})$, мб
0	3,392	3,870
0,528	3,768	4,339
0,6	3,835	4,387
1	4,117	4,731

При использовании библиотек ENDF/B-VII.1 микросечение графита в асимптотической области равно измеренному ($\sigma_{\text{eff}}(0,0253 \text{ эВ}) = 4,19 \text{ мб}$) при борном эквиваленте 0,56 ppm вес., т.е. является достаточно близким к значению, определенным по длине релаксации.

В качестве иллюстрации влияния на результат некорректного учета примесей в графите представлены результаты расчетов с помощью программы Serpent модельной задачи 2.4. В таблице 14 приведены результаты расчета рассматриваемой модели с использованием библиотек ENDF/B-VII.0 и ENDF/B-VII.1. В рассматриваемом случае использовалось одно и то же значение борного эквивалента при расчете концентраций для всех компонентов из графита, включая шаровые топливные элементы.

Таблица 14 – Результаты расчетов с помощью программы Serpent упрощенной модели стенда АСТРА

Библиотека	$K_{\text{эф}}$	Борный эквивалент, ppm мас.	$\sigma_{\text{eff}}(0.0253 \text{ эВ})$, мб
ENDF/B-VII.0	1,1963	1,0	4,21
ENDF/B-VII.1	1,1964	0,43	4,22
ENDF/B-VII.1	1,1740	1,0	4,70

Как видно из результатов, при использовании одного и того же значения борного эквивалента в расчетах с различными библиотеками нейтронных данных, различия в значениях $K_{\text{эф}}$ составляет 1,6 % $\Delta k/k$. Если же значение борного эквивалента при расчете с библиотеками ENDF/B-VII.1 выбрано так, чтобы тепловое сечение поглощения графита при 0,0253 эВ сохранялось равным 4,2 мбарн, то результат расчета $K_{\text{эф}}$ практически совпадает с расчетом с использованием библиотеки ENDF/B-VII.0.

Так как измеренной величиной, характеризующей поглощение нейтронов в графите для стенда АСТРА является сечение поглощения графита ($\sigma_{\text{eff}}(0,0253 \text{ эВ}) = 4,19 \text{ мбарн}$), то расчет должен воспроизводить эту величину (в асимптотической области) независимо от используемых библиотек сечений. Для ENDF/B-VII.1 и других библиотек с микросечением углерода при энергии 0,0253 эВ 3,861 мбарн получено значение борного эквивалента 0.4 ppm вес.

Таким образом, проведены исследования, позволившие дополнительно обосновать содержание примесей в графите стенда АСТРА, приведенное в описании бенчмарка IEU-COMP-THERM-008, что повысило качество этого бенчмарка. Разработаны рекомендации по сравнению расчетов с разными библиотеками ядерных данных в случае стенда АСТРА с учетом содержания примесей в графите.

В главе 5 (Методика подготовки констант с использованием программ на основе метода Монте-Карло) приведено краткое описание подходов к определению мало групповых макросечений и коэффициентов диффузии, реализованных в программах Serpent и MCU-HTR. В программе Serpent при подготовке групповых макроконстант используются два энергетических разбиения: мало групповая структура, заданная пользователем, для которой необходимо получить макросечения, и промежуточная многогрупповая структура (по умолчанию используется 70-групповая структура). В процессе расчета методом Монте-Карло регистрируются потоки нейтронов и скорости реакций в промежуточной многогрупповой структуре. По окончании расчета методом Монте-Карло проводится свертка много-

групповых макросечений и потоков в малые группы. При этом могут быть использованы методы учета утечки (для ячеечного расчета), в частности, B1 приближение.

В программе MCU-HTR при подготовке групповых макроконстант в процессе расчета методом Монте-Карло потоки нейтронов и скорости реакций регистрируются в итоговой малогрупповой структуре.

Программы MCU-HTR и Serpent используют различные методы расчета коэффициента диффузии. В программе Serpent реализовано три метода расчета коэффициентов диффузии:

1) диффузионно-транспортное приближение, позволяющее проводить гомогенизацию как в закрытой ячейке, так и в реакторном расчете. Данное приближение применимо как для топливных, так и нетопливных областей. Но при этом, в данном методе отсутствует возможность готовить анизотропные коэффициенты диффузии;

2) метод кумулятивной миграции (СММ), основанный на регистрации среднего квадрата длины смещения нейтрона от точки его рождения до точки поглощения или смены энергетической группы, позволяющий более корректно учитывать анизотропию рассеяния. Данный метод дает возможность подготавливать анизотропные коэффициенты диффузии, но применим только в расчете бесконечной ячейки;

3) B1-приближение, позволяющее получать коэффициенты диффузии, более корректно учитывающие утечку, чем диффузионно-транспортное приближение, однако данное приближение применимо только для топливных областей.

В программе MCU-HTR подготовка групповых коэффициентов диффузии выполняется путем регистрации площади миграции нейтронов в заданных областях, что, по сути, является аналогом метода СММ, реализованного в Serpent, но с возможностью применения к конечным областям, что позволяет получать коэффициенты диффузии в реакторном расчете.

С использованием модельных задач 1 и 2.4 (таблица 8) с помощью программ MCU-HTR и Serpent подготовлены наборы макроконстант для топливных и нетопливных элементов критического стенда АСТРА. Поскольку коэффициент диффузии в диффузионно-транспортном приближении, реализованном в Serpent, не поддерживает расчет анизотропных коэффициентов диффузии в рамках опции диффузионно-транспортного приближения, а метод СММ позволяет получать анизотропные коэффициенты диффузии, но только путем расчета бесконечной среды, в котором гомогенизация проводится по всей расчетной области целиком, расчет анизотропных коэффициентов диффузии для нетопливных зон с помощью стандартных опций Serpent невозможен.

Для подготовки анизотропных групповых коэффициентов диффузии нетопливных областей с помощью программы Serpent была разработана следующая методика:

- для выбранной нетопливной ячейки (пространства в терминах Serpent) в полномасштабном расчете готовятся все малогрупповые макросечения. В результате для данной ячейки рассчитывается спектр потока нейтронов в промежуточной многогрупповой структуре, принятой в Serpent;

- проводится расчет выбранной нетопливной ячейки с условиями отражения по программе Serpent с равномерно распределенным источником нейтронов. В качестве энергетического спектра источника нейтронов используется спектр нейтронов, полученный в полномасштабном расчете. Спектр нейтронов, который получится в результате расчета вышеописанной задачи, будет отличаться от спектра нейтронов в выбранной ячейке в полномасштабном расчете, особенно в быстрой области, поэтому осуществить свертку коэффициентов диффузии в малые группы на данном спектре не вполне корректно. Поэтому свертка по энергии не проводится, то есть получаются гомогенизированные по выбранной нетопливной ячейке коэффициенты диффузии в промежуточной многогрупповой структуре, принятой в Serpent (70 групп). Получаются изотропные коэффициенты диффузии в диффузионно-транспортном приближении и анизотропные коэффициенты диффузии, рассчитанные методом СММ;

- 70-групповые коэффициенты диффузии сворачиваются в малые группы с использованием 70-группового спектра, полученного для выбранной нетопливной ячейки в полномасштабном расчете.

Данная методика была применена для подготовки коэффициентов диффузии для областей графитовых блоков с каналом в БО и ВО.

Для подготовки макроконстант активной зоны и сплошного графита помимо полномасштабного расчета использовались ячейки с условиями отражения. Для ячеек сплошного графита бокового и внутреннего отражателей в качестве энергетического распределения источника нейтронов использовался спектр, полученный из полномасштабного расчета.

Проведен анализ полученных макроконстант и подготовлен ряд вариантов для диффузионных расчетов. Путем сравнения соответствующих диффузионных расчетов моделей 1 и 2.4 с результатами расчета методом Монте-Карло определены способы гомогенизации и методы подготовки коэффициентов диффузии, обеспечивающие наименьшее различие между моделями 1 и 2.4 в расхождении с расчетом методом Монте-Карло по коэффициенту размножения. На основе проведенных исследований сделан вывод о наилучших способах подготовки макроконстант для топливных и нетопливных элементов реактора.

Для подготовки констант для стержней на основе модели 2.4 в программах MCU-HTR и Serpent разработаны упрощенные модели, в которых смоделированы все органы регулирования критического стенда АСТРА (КО1 – КО7). Горизонтальный разрез рассматриваемой системы с опущенными стержнями КО1, КО6, КО7 представлен на рисунке 12 Красным цветом выделены области гомогенизации, в которых с помощью программ MCU-HTR и Serpent в полномасштабном расчете подготавливались макроконстанты. Далее с использованием полученных констант проводились расчеты с помощью интеллектуальной системы SHIPR.

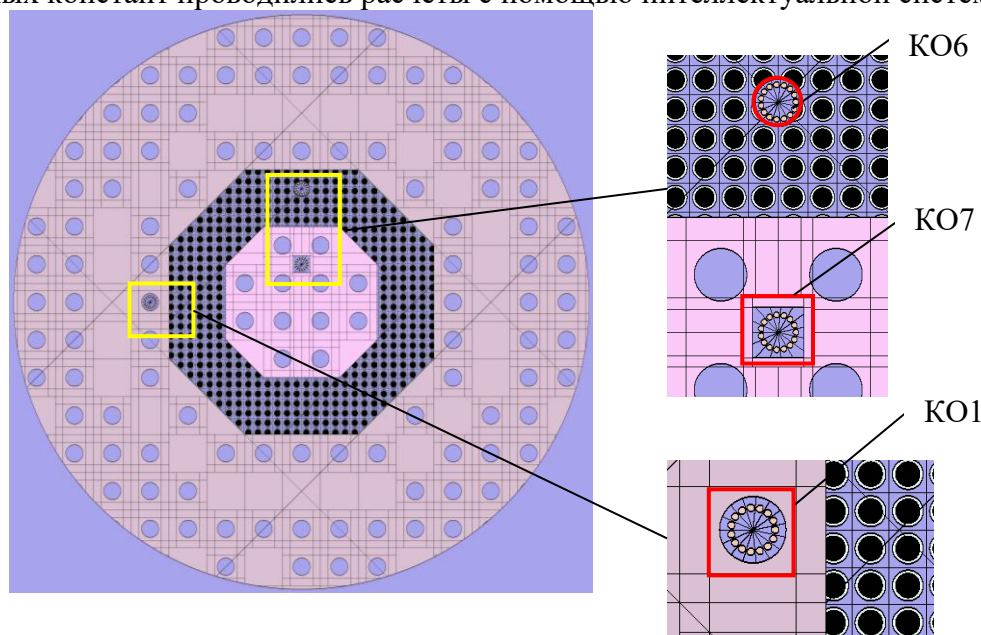


Рисунок 12 – Расчетная модель для подготовки констант для стержней КО-1 – КО7 критического стенда АСТРА

Результаты расчета весов стержней КО1 – КО7 для данной модели с помощью программ MCU-HTR, Serpent и SHIPR приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Результаты расчетов весов стержней КО1 - КО7 для рассматриваемой модели

Орган регули- рования	Serpent (A), $\rho/\beta_{эфф}$	MCU-HTR (B), $\rho/\beta_{эфф}$	SHIPR+ Serpent (C) , $\rho/\beta_{эфф}$	SHIPR+ MCU (D), $\rho/\beta_{эфф}$	(A-C)/A, %	(B-D)/B, %
КО1	2,66	2,74	2,83	2,79	-6,4	-1,8
КО2	2,61	2,64	2,77	2,61	-6,1	1,1
КО3	2,68	2,74	2,84	2,80	-6,0	-2,2
КО4	2,11	2,21	2,21	2,26	-4,7	-2,3
КО5	2,72	2,81	2,87	2,84	-5,5	-1,1
КО6	4,63	4,68	4,71	4,33	-1,7	7,5
КО7	7,02	6,93	7,61	7,40	-8,4	-6,8

Полученные результаты расчетов весов стержней с помощью программы SHIPR с использованием констант, подготовленных методом Монте-Карло в полномасштабных реакторных расчетах программами MCU-HTR и Serpent, находятся в хорошем согласии с результатами расчетов по программам MCU-HTR и Serpent. Отличия рассчитанных с помощью SHIPR весов стержней, находящихся в боковом отражателе, от соответствующих значений, полученных расчетом с помощью программы Монте Карло, в среднем, составляют 1.7% и 5.7% для констант, подготовленных с помощью MCU-HTR и Serpent соответственно. Для стержня, находящегося в активной зоне, данные отклонения составляют -1.7% и 7.5%, для стержня во внутреннем отражателе -8.4% и -6.4% для констант, подготовленных с помощью MCU-HTR и Serpent соответственно. Таким образом константы для органов регулирования, подготовленные с помощью программы MCU-HTR, позволяют более точно описать 6 из 7 органов регулирования. Однако стоит отметить, что для единственного стержня КО6, расположенного в активной зоне, константы, подготовленные с помощью Serpent, обеспечивают меньшее отклонение, а именно для данного стержня наблюдалось наибольшее отклонение в расчетах с использованием констант, подготовленных по программе WIMS.

Для апробации разработанной методики с использованием моделей, разработанных для расчетного анализа экспериментальных конфигураций критического стенда АСТРА с помощью программы MCU-HTR, также были подготовлены макроконстанты для профилирующих органов регулирования, расположенных в активной зоне и во внутреннем отражателе. С использованием полученных констант для профилирующих органов регулирования разработаны расчетные модели наиболее простой экспериментальной конфигурации 1А и наиболее сложной конфигурации 7А критического стенда АСТРА. С помощью разработанных моделей проведены расчеты эффективности органов регулирования. В таблицах 16, 17 приведены результаты экспериментов, расчетов с использованием программы MCU-HTR, программы SHIPR с использованием различных наборов констант.

Таблица 16 – Расчеты эффективности органов СУЗ в конфигурации 1А

	Экспе- римент (Э), $\rho/\beta_{эфф}$	Расчет MCU (P1), $\rho/\beta_{эфф}$	Расчет SHIPR+ WIMS (P2), $\rho/\beta_{эфф}$	Расчет SHIPR+ MCU (P3), $\rho/\beta_{эфф}$	(P1-Э)/Э, %	(P2-Э)/Э, %	(P3-Э)/Э, %
КО1	-2,92	-2,91	-3,01	-2,84	-0,5	2,9	-2,6
КО2	-2,72	-2,79	-2,53	-2,63	2,4	-6,8	-3,4
КО3	-2,91	-2,95	-3,03	-2,87	1,4	4,1	-1,3
КО4	-2,39	-2,46	-2,54	-2,37	2,9	6,2	-0,7
КО5	-3,12	-3,03	-3,20	-2,91	-2,8	2,7	-6,7
КО6	-5,17	-5,07	-4,08	-4,43	-1,9	-21,2	-14,4
КО7	-6,64	-6,56	-6,85	-6,75	-1,2	3,2	1,7

Таблица 17 – Расчеты эффективности органов СУЗ в конфигурации 7А

	Эксперимент (Э), $\rho/\beta_{\text{эфф}}$	Расчет MCU (P1), $\rho/\beta_{\text{эфф}}$	Расчет SHIPR+ WIMS (P2), $\rho/\beta_{\text{эфф}}$	Расчет SHIPR+ MCU (P3), $\rho/\beta_{\text{эфф}}$	(P1-Э)/Э, %	(P2-Э)/Э, %	(P3-Э)/Э, %
KO1	-4,08	-4,14	-4,91	-4,61	1,4	20,3	13,0
KO2	-3,57	-3,55	-3,90	-3,80	-0,6	9,2	6,5
KO3	-3,38	-3,42	-3,74	-3,63	1,3	10,8	7,3
KO4	-1,73	-1,82	-1,76	-1,74	5,0	1,9	0,8
KO5	-3,91	-4,10	-4,40	-4,24	4,9	12,4	8,5
KO6	-6,09	-5,90	-5,68	-5,70	-3,2	-6,7	-6,4
KO7	-6,19	-6,37	-6,89	-6,79	2,9	11,2	9,8

Результаты расчета весов стержней в экспериментальных конфигурациях показали, что разработанная методика подготовки констант позволяет снизить погрешность диффузионного расчета характеристик органов регулирования. В среднем отклонения расчетных значений весов органов регулирования снизились с 6.7% до 4.4% для наиболее простой конфигурации 1А и с 10.3% до 7.5% для наиболее сложной конфигурации 7А.

Также с системой констант, подготовленной с помощью программы MCU-HTR, была проведена серия расчетов нестационарных экспериментов на конфигурации 6В. Полученные по результатам расчетов зависимости постоянных спада от величины подкритичности с использованием различных систем констант представлены на рисунке 13.

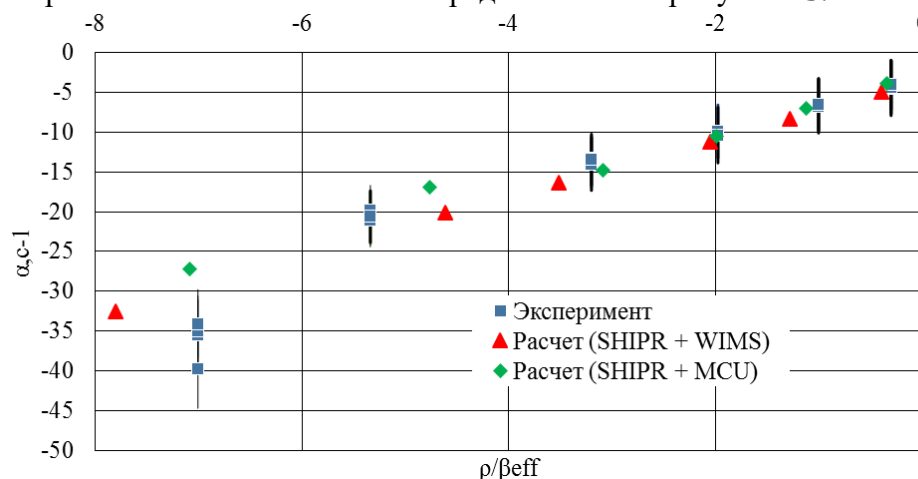


Рисунок 13 – Результаты расчетов зависимостей постоянных спада от величины подкритичности, полученных с использованием различных наборов макроконстант

Из графиков видно, что использование макроконстант, полученных с помощью программы MCU-HTR, обеспечивает меньшее расхождение с экспериментом как величин подкритичности, так и показателей экспоненты α , следовательно, можно сделать вывод, что разработанная методика подготовки констант также позволяет повысить точность диффузионного расчета нестационарных экспериментов по сравнению с системой констант, подготовленной с помощью программы WIMS.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. С помощью программы MCU-HTR, реализующей метод Монте Карло и программы SHIPR, реализующей многогрупповое диффузионное приближение, разработаны расчетные модели и выполнен расчетный анализ стационарных экспериментов по определению критических параметров, пространственных распределений скоростей реакций деления ^{235}U и определения характеристик органов регулирования для всех экспериментальных конфигураций критического стенда АСТРА, полученных в ходе трех серий экспериментов по изучению нейтронно-физических характеристик перспективного реактора типа ВТГР с кольцевой ак-

тивной зоной. Путем сравнения расчетных и экспериментальных результатов сделаны выводы о применимости используемых методик и источниках расхождений экспериментальных и расчетных данных.

2. С помощью программы SHIPR впервые выполнен расчетный анализ нестационарных экспериментов на конфигурациях 1А, 5А, 6В, 7В, 8В по определению кинетических параметров методом Симмонса-Кинга. Групповые скорости, используемые для решения пространственно-временной задачи, подготовлены с помощью программы MCU-HTR. С целью оптимизации точности расчета и затраченного расчетного времени проведено исследование влияния различных параметров моделирования на результаты пространственно-временного расчета.

3. Разработана методика кросс-верификации программ, реализующих метод Монте-Карло применительно к системам ВТГР, которая включает в себя исследования влияния на результаты расчета способа моделирования топливных частиц, моделей термализации и библиотек ядерных данных. Проведена кросс-верификация программ MCU-HTR и Serpent. Установлена некорректная работа модуля расчета термализации нейтронов в графите с непрерывным слежением за энергией нейтрона FIMTOEN в программе MCU-HTR. В результате проведенных исследований разработчиками программы MCU в версию программы MCU-HTR 2011 года были внесены исправления.

4. С помощью программы Serpent выполнено моделирование экспоненциальных экспериментов на стенде РБМК и верифицирована методика определения борного эквивалента примесей в графите. Разработаны рекомендации по сравнению расчетов с разными библиотеками ядерных данных с учетом борного эквивалента для стенда АСТРА.

5. Разработана методика подготовки констант для топливных и нетопливных элементов реакторов типа ВТГР с использованием программ Serpent и MCU-HTR, реализующими метод Монте-Карло. Для каждой из зон упрощенных моделей критического стенда АСТРА подготовлены различные наборы констант, которые отличались как способом гомогенизации, так и методом расчета коэффициента диффузии. Сравнение результатов диффузионных расчетов с различными наборами констант с результатами расчета соответствующих моделей методом Монте-Карло позволили сделать вывод о наиболее подходящих способах гомогенизации и методах расчета коэффициентов диффузии для топливных и нетопливных зон реакторов ВТГР. Применение разработанной методики для диффузионного расчета экспериментальных конфигураций критического стенда АСТРА позволило повысить точность диффузионного расчета относительно экспериментальных данных, что дополнительно подтверждает ее применимость для реакторов данного типа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Volkov, Y. N., **Kruglikov, A. E.**, Zizin, M. N., Boyarinov, V. F., Nevinita, V. A., & Fomichenko, P. A. (2018). Verification of the non-stationary neutronic calculation module in the SHIPR software system for modelling of experiments at the ASTRA HTGR type critical facility. Journal of Physics: Conference Series, 1133.
2. Shchurovskaya, M. V., Geraskin, N. I., Siddiquee, M. S., & **Kruglikov, A. E.** (2018). Few group cross sections generation using MCU-PTR and Serpent for diffusion calculation of light water research reactor. Journal of Physics: Conference Series, 1133.
3. Волков, Ю. Н., **Кругликов, А. Е.**, & Щербаков, А. А. (2019). ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕАКТОРА ТИПА ВТГР ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА — ШАГ К «ЗЕЛеной» ЭНЕРГЕТИКЕ БУДУЩЕГО. // ВАНТ, сер. Ядерно-реакторные константы, вып. 3, 2019., с. 128-135.
4. Волков Ю.Н., **Кругликов А.Е.**, Зизин М.Н., Бояринов В.Ф., Невиница В.А., Фомиченко П.А., Бобров А.А. (2019) МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА КРИТИЧЕСКОМ СТЕНДЕ АСТРА С ПОМОЩЬЮ

ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ SHIPR // ВАНТ, сер. Ядерно-реакторные константы, вып. 3, 2019., с. 110-119.

5. M. N. Zizin, V. F. Boyarinov, V. A. Nevinitisa, P. A. Fomichenko, Yu. N. Volkov and **A. E. Kruglikov**. (2020) Verification of the stationary module of the SHIPR software system for modelling experiments of the ASTRA HTGR type critical facility // KERNTECHNIK, 2020 Vol. 85, No. 1 pp. 4-8
6. Shchurovskaya M.V., Geraskin N. I., & **Kruglikov A. E.** (2020). Comparison of research reactor full-core diffusion calculations with few-group cross sections generated using Serpent and MCU-PTR. *Annals of Nuclear Energy*, 141, 107361
7. V. A. Nevinitisa, V. F. Boyarinov, P. A. Fomichenko, A. A. Zimin, A. E. Glushkov, N. P. Moroz, Y. N. Volkov and **A. E. Kruglikov** (2021) Axial Distributions of Fission Reaction Rates in the Annular Core of the ASTRA Critical Facility with Poison Profiling Elements in the Internal Reflector, *Physics of atomic nuclei*, 84, 8, 1397-1404
8. M.V. Shchurovskaya, **A. E. Kruglikov**, Yu. N. Volkov, N. I. Geraskin, V. A. Nevinitisa, P. A. Fomichenko, V. E. Jitarev (2022) Simulation-based studies on graphite absorption properties for ASTRA critical experiments. *Annals of Nuclear Energy*, 170, 109013
9. Volkov, Y. N., **Kruglikov, A. E.**, & Shcherbakov, A. A. (2018). High-temperature reactor for hydrogen productions - a step towards future green energy. *Journal of Physics: Conference Series*, 1133, 012042.
10. **A E Kruglikov** , M V Shchurovskaya , Yu N Volkov , V A Nevinitisa , P A Fomichenko and M N Zizin (2020) Homogenised group constants generation using Monte Carlo codes for diffusion calculation of pebble bed reactor. *Journal of Physics: Conference Series*, 1689.
11. **A E Kruglikov**, Yu N Volkov, M N Zizin, V F Boyarinov, V A Nevinitisa and P A Fomichenko (2020) Computational analysis of experiments to determine the kinetic parameters at the ASTRA HTGR type critical facility. *Journal of Physics: Conference Series*, 1689.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю Волкову Юрию Николаевичу за предложенную тему диссертационной работы, научное руководство, ценные советы и поддержку.

Автор очень признателен научным консультантам Щуровской Марии Владимировне и Невинице Владимиру Анатольевичу за непрерывно оказываемую помощь, мотивацию и наставления при работе над диссертацией.

Автор благодарит за бесценную помощь Марову Елену Викторовну.

Автор многим обязан сотрудникам кафедры «Теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов» №5 Гераскину Николаю Ивановичу, Савандеру Владимиру Игоревичу, Шмелеву Анатолию Николаевичу и Наумову Владимиру Ильичу за несчетное число ценных советов и конструктивную критику на семинарах кафедры и института, посвященных данной работе.

Автор благодарит Зизина Михаила Николаевича за возможность использовать интеллектуальную систему SHIPR для выполнения расчетов, Фомиченко Петра Анатольевича за предоставленные данные об экспериментах на критическом стенде АСТРА, бенчмарк – описаний по тематике высокотемпературных реакторов, а также за ценные замечания к работе и Боброва Анатолия Александровича за содействие в получение экспериментальных данных.

Отдельной благодарности заслуживают коллеги по лаборатории физики и техники исследовательских реакторов Насонов Владимир Андреевич и Песня Юрий Егорович за приобретение автором бесценного опыта и широкого спектра навыков, непосредственно используемых при работе над диссертацией.

Искреннюю благодарность автор выражает родным и друзьям за моральную поддержку.